

AVALIAÇÃO DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS PRODUZIDO EM UM SISTEMA PILOTO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA DE LODO

VINICIUS ANTONIO PAULI PAES

Orientador: Paulo Belli Filho

2012/2



Universidade Federal de Santa Catarina
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental
Trabalho de Conclusão de Curso – TCCII

**AVALIAÇÃO DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS
PRODUZIDO EM UM SISTEMA PILOTO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA DE LODO**

Vinícius Antônio Pauli Paes

Orientador
Prof. Paulo Belli Filho

Florianópolis (SC)
Fevereiro de 2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL

AVALIAÇÃO DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS
PRODUZIDO EM UM SISTEMA PILOTO DE DIGESTÃO
ANAERÓBIA DE LODO

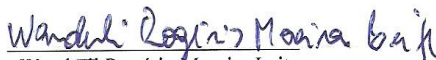
VINICIUS ANTONIO PAULI PAES

Trabalho submetido à Banca
Examinadora como parte dos requisitos
para Conclusão do Curso de Graduação
em Engenharia Sanitária e Ambiental–
TCC II

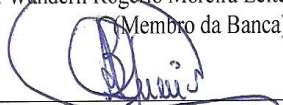
BANCA EXAMINADORA :



Prof. Dr. Paulo Belli Filho
(Orientador)



Engo. Wanderli Rogério Moreira Leite
(Membro da Banca)



Prof. Dr. Armando Borges
(Membro da Banca)

FLORIANÓPOLIS, (SC)
FEVEREIRO/2013

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais por todo incentivo e suporte necessário a minha formação.

Ao engenheiro Wanderli Rogério Leite pelos dados fornecidos, pelos ensinamentos e por toda a ajuda durante a produção desta pesquisa.

Ao Professor Paulo Belli Filho pela orientação deste trabalho.

Ao engenheiro Antônio Carlos Leonel de Carvalho pelos aprendizados e oportunidade de estágio.

Aos meus colegas de graduação pelos momentos incríveis que passamos durante esses 6 anos.

RESUMO

O lodo produzido nas estações de tratamento de esgoto necessita de um tratamento para que possa se tornar um produto mais estável - adequando-se as políticas ambientais de disposição - e com menor volume. Uma das formas de tratamento do lodo é a digestão anaeróbia. Neste processo, microrganismos, na ausência de oxigênio, fermentam a matéria orgânica, gerando biogás. O crescimento da demanda de energia e o impacto causado pelas fontes energéticas tradicionais, exigem investimento em pesquisas que favorecessem a utilização de uma fonte alternativa de energia, menos poluente e mais sustentável, como o biogás. O objetivo deste trabalho é avaliar o aproveitamento energético do biogás produzido em um sistema piloto de digestão anaeróbia de lodo. Para isso, foi calculada a autossuficiência do digestor piloto, avaliando o potencial energético do biogás gerado pelo digestor, a quantidade de energia perdida pelo digestor na forma de calor e a energia necessária ao funcionamento do digestor. O potencial de energia elétrica disponibilizado é de 0,80 W e a perda de energia na forma de calor é 14,03 W. Os dados de biogás utilizados foram coletados entre agosto de 2010 e fevereiro de 2011, do digestor piloto que está localizado na ETE Insular em Florianópolis.

Palavras-Chave: digestor anaeróbio de lodo, biogás, metano, energia, energia elétrica, cogeração.

ABSTRACT

The sludge produced in wastewater treatment plants requires a treatment to become a more stable product – to reach the environmental policies - and with less volume. One of the forms of sludge treatment is anaerobic digestion. In this process, microorganisms in the absence of oxygen ferment the organic fraction of the sludge, generating biogas. The growth of energy demand and the impact caused by traditional energy sources, required investment in research that favored the use of an alternative source of energy, more sustainable and less polluting, such as biogas. The aim of this study is to evaluate the energy use of biogas produced in a pilot system of anaerobic digestion of sludge. For this, it was calculated the self-reliance pilot digester, evaluating the energy potential of biogas, the amount of energy lost by the digester in the form of heat and the energy required for the operation of the digester. The potential of electric energy available is 0.80 W and the loss of energy in the form of heat is 14.03 W. The data of biogas used were collected between August 2010 and February 2011, from the pilot digester that is located at ETE Insular, in Florianópolis.

Keywords: Anaerobic digester of sludge, biogas, methane, electric energy, cogeneration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processos da digestão anaeróbia. Fonte: adaptado de Lettinga <i>et al.</i> (1996).....	26
Figura 2 - formação do metano a partir do acetato (esquerda) e do dióxido de carbono (direita) fonte: DEUBLEIN & STEINHAUSER, 2008.....	29
Figura 3 - classes de microrganismos de acordo com a temperatura. Fonte: adaptado de MADIGAN <i>et al.</i> (1996) <i>apud</i> LEITE (2011).....	30
Figura 4 - Poder calorífico inferior por concentração de metano. Fonte: adaptado PAUSS (1987) <i>apud</i> LIMA (2005).....	34
Figura 5 - Representação de um sistema de cogeração por motogerador e por turbina a gás. Fonte: MONTE, 2010.....	38
Figura 6 - Localização do digestor na ETE Insular. Fonte: Google Earth, 2012.....	43
Figura 7 - Digestor Anaeróbio Piloto. Fonte: LEITE, 2011	44
Figura 8 - Representação do Balanço energético no digestor	49
Figura 9- Qualidade do biogás produzido pelo digestor anaeróbio de lodo.....	52
Figura 10 - Vazão de biogás e metano produzidos no digestor anaeróbio de lodo.....	54
Figura 11 - Vazão de biogás x Potencial energético disponibilizado....	57
Figura 12 - Correlação entre vazão de biogás e potencial de energia disponibilizado	58
Figura 13 - Representação do balanço energético.....	61

Figura 14 - Vazão de biogás necessária para autossuficiência.....	62
Figura 15 - Potencial de energia disponibilizado durante os meses de medição do biogás.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - requisitos ambientais relacionados à produção de metano. .	31
Tabela 2 - Concentração dos gases que constituem o biogás.....	33
Tabela 3 - Tecnologias para geração de energia a partir do biogás.	39
Tabela 4 - Parâmetros utilizados para produção de energia elétrica.	45
Tabela 5 - Avaliação qualitativa do biogás produzido para as diferentes COV aplicadas no digestor	53
Tabela 6 - Avaliação quantitativa do biogás produzido para as diferentes COV aplicadas no digestor	55
Tabela 7 - Potencial de energia disponibilizado por mês.....	57
Tabela 8 - Perda de energia do digestor na forma de calor	59
Tabela 9 – Energia necessária ao funcionamento do digestor.....	60
Tabela 10 - Qualidade do biogás antes e após tratamento	63
Tabela 11 - Aparelhos domésticos supridos pela energia gerada.....	65

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
2. OBJETIVOS	23
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
3.1. DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	24
3.1.1. <i>Metabolismo</i>	25
3.1.2. <i>Requisitos Ambientais</i>	29
3.2. BIOGÁS.....	31
3.2.1. <i>Histórico do Biogás</i>	31
3.2.2. <i>Composição e Características do biogás</i>	32
3.3. TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO ENERGÉTICA	35
3.3.1. <i>Energia Elétrica</i>	36
3.3.2. <i>Cogeração</i>	37
3.3.3. <i>Comparação de tecnologias</i>	38
3.4. BIOGÁS E AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....	39
4. METODOLOGIA	41
4.1. PROJETO PILOTO	42
4.2. ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS DE BIOGÁS.....	44
4.3. CÁLCULOS DE ENERGIA.....	45
4.3.1. <i>Energia Elétrica</i>	45
4.3.2. <i>Balanco Energético</i>	49
4.3.3. <i>Cogeração</i>	50

4.4.	USO DA ENERGIA GERADA	51
4.4.1.	<i>Economia na conta de energia elétrica.....</i>	<i>51</i>
4.4.2.	<i>Utilização da energia gerada.....</i>	<i>51</i>
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5.1.	ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS	52
5.1.1.	<i>Análise qualitativa</i>	<i>52</i>
5.1.2.	<i>Análise quantitativa.....</i>	<i>54</i>
5.2.	GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	56
5.2.1.	<i>Potencial de energia elétrica disponível.....</i>	<i>56</i>
5.2.1.	<i>Energia dissipada</i>	<i>58</i>
5.2.2.	<i>Energia necessária ao funcionamento do digestor .</i>	<i>59</i>
5.2.3.	<i>Balanco energético</i>	<i>60</i>
5.3.	COGERAÇÃO DE ENERGIA	63
5.4.	AVALIAÇÃO ECONÔMICA.....	64
5.4.1.	<i>Economia na conta de energia elétrica.....</i>	<i>64</i>
5.4.2.	<i>Utilização da energia gerada.....</i>	<i>65</i>
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	68
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70
8.	ANEXOS.....	75

1. INTRODUÇÃO

Os processos de tratamento de esgotos são, em última instância, mecanismos de separação dos sólidos (lodo) da água. Enquanto a última retorna para os rios, virtualmente isenta de impurezas que carregava, os sólidos retirados precisam ser estabilizados e dispostos de forma a não causar impactos significativos ao meio ambiente ou à saúde da população (CASSINI, 2003).

O destino final do lodo é, portanto, uma atividade de grande importância e complexidade, pois frequentemente extrapola os limites das estações de tratamento e exige a integração com outros setores da sociedade (ANDREOLI, 2001). Para isso existem formas de tratamento de estabilização do lodo, que o tornam menos putrescível, e patogênico.

A digestão anaeróbia é a tecnologia mais antiga e amplamente utilizada para este fim. Consiste na decomposição da matéria orgânica por microrganismos na ausência de oxigênio e com a possibilidade de produção de biogás para fins de valorização energética (METCALF & EDDY, 2003).

Para o desenvolvimento sustentável tanto de países desenvolvidos quanto em desenvolvimento é necessária à busca, desenvolvimento e incentivo de tecnologias que utilizem fontes renováveis de energia, possibilitando com isso a criação de fontes de suprimentos descentralizadas e em pequena escala (COLDEBELLA et al., 2006). A preocupação mundial neste sentido se reflete através de tratados e programas internacionais, como por exemplo, o Protocolo de Quioto, a Agenda 21 e recentemente, no Brasil, a conferência Rio +20.

O biogás é composto por grande parcela de gás metano (CH_4), que quando lançado na atmosfera apresenta potencial de poluição 21 vezes superior ao dióxido de carbono (CO_2) no que se refere ao efeito estufa, sendo que sua utilização na geração de energia leva a uma redução do potencial de poluição ambiental (COELHO et al., 2006).

Neste sentido, este trabalho tem como objetivo, avaliar o aproveitamento energético do biogás produzido em um sistema piloto de digestão anaeróbia de lodo. Este trabalho faz parte de uma pesquisa desenvolvida pelo laboratório de efluentes líquidos e gasosos do departamento de engenharia sanitária e ambiental da Universidade

Federal de Santa Catarina. Os dados obtidos correspondem a medições realizadas ao longo da referida pesquisa. Os resultados servirão como subsídios técnicos para futuros projetos de valorização energética de biogás em escala real.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o aproveitamento energético do biogás produzido em um sistema piloto de digestão anaeróbia de lodo.

Os objetivos específicos são:

- Avaliar a quantidade e a qualidade do biogás produzido
- Estimar a produção de energia por meio de um processo de transformação convencional e através da cogeração
- Avaliar as potencialidades de uso da energia produzida no digestor em estudo

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para o entendimento deste trabalho faz-se necessário uma revisão teórica dos assuntos contidos no mesmo. Serão revisados os seguintes temas:

- Digestão Anaeróbia (metabolismo, microbiota, parâmetros de projeto e condições ambientais).
- Biogás (geração, composição, características, formas de aproveitamento).
- Princípios da conversão energética (tecnologias de transformação do biogás em energia)
- Biogás e as mudanças climáticas

3.1. Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia, historicamente, é uma das mais antigas formas de tratamento biológico de águas residuárias que ainda está em uso, e pode ser realizado em sistema de batelada ou processo contínuo (AMUDA ET al., 2008 apud ANTÃO, 2011).

É um processo bioquímico complexo, onde diversos grupos de organismos anaeróbios e facultativos assimilam e destroem simultaneamente a matéria orgânica, em ausência de oxigênio dissolvido (JORDÃO & PESSOA, 2011). Os microrganismos promovem a transformação de compostos orgânicos complexos em produtos mais simples como metano e gás carbônico. (Bueno, 2010)

Essa transformação envolve processos metabólicos, representando um sistema ecológico delicadamente balanceado que ocorrem em etapas sequenciais e que são dependentes da atividade de diversos grupos de bactérias, tendo cada grupo condições ótimas de trabalho (CHERNICHARO, 2007).

Estes grupos de bactérias são sensíveis e, possivelmente, inibidos por vários parâmetros do processo tais como pH, alcalinidade, concentração de amônia livre, hidrogênio, sódio, potássio, metais pesados, ácidos graxos voláteis e outros (APPELS et al., 2008).

3.1.1. Metabolismo

A Figura 1 esquematiza os processos envolvidos na digestão anaeróbia.

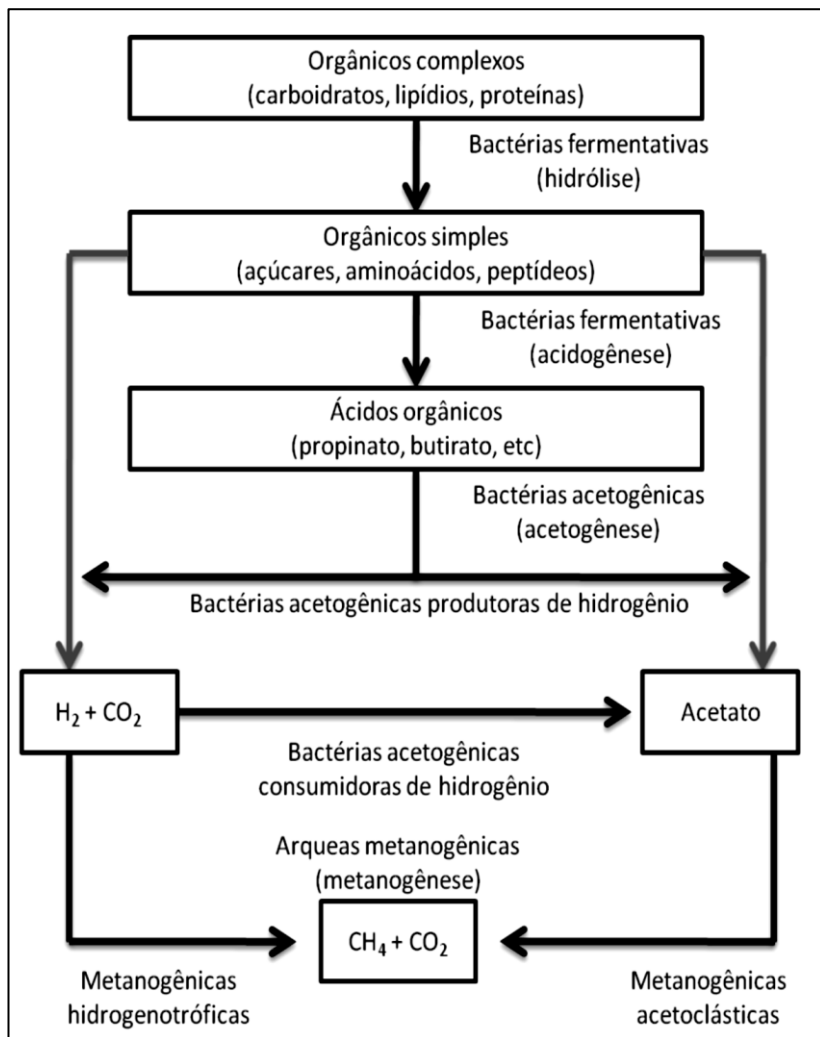


Figura 1 - Processos da digestão anaeróbica. Fonte: adaptado de Lettinga *et al.* (1996)

Para que seja possível entender o mecanismo de atuação deste processo, são descritas as principais etapas.

1. Hidrólise

Na hidrólise, as moléculas com elevado peso molecular são convertidas em compostos dissolvidos com menor peso molecular. Estas moléculas são, na sua grande maioria, hidratos de carbono, proteínas e lipídeos, constituídas por várias moléculas menores unidas através de ligações químicas que facilmente entram em solução assim que as ligações sejam quebradas (GERARDI, 2003).

Os microrganismos envolvidos no metabolismo da digestão anaeróbia não conseguem utilizar diretamente substratos na forma de compostos complexos suspensos ou na forma coloidal por terem dimensões que não permitem a passagem através da membrana celular, as enzimas extracelulares convertem esses compostos mais complexos em moléculas pequenas, como por exemplo, aminoácidos e açúcares simples (PIRES, 2007). Um exemplo de um composto insolúvel que sofre hidrólise em um digestor anaeróbio é a celulose (GERARDI, 2003).

2. Acidogênese

Os produtos solúveis da primeira etapa (açúcares, aminoácidos e ácidos graxos) são fermentados pelos microorganismos acidogênicos em ácidos orgânicos (principalmente acético, butírico e propiônico), álcoois e compostos minerais (CO_2 , H_2 , NH_3 , H_2S) (LOBATO, 2011).

A maioria das bactérias acidogênicas são anaeróbias estritas, mas cerca de 1% consiste de bactérias facultativas que podem oxidar o substrato orgânico por via oxidativa. Isso é particularmente importante, uma vez que as bactérias estritas são protegidas contra a exposição ao oxigênio eventualmente presente no meio (LETTINGA et al., 1996).

3. Acetogênese

As bactérias acetogênicas oxidam os ácidos gordos voláteis e o álcool produzidos na etapa anterior a acetato e dá-se uma redução de prótons a hidrogênio (PIRES, 2009).

Existem dois tipos de bactérias intervenientes na acetogênese: as bactérias acetogênicas produtoras obrigatórias de metano e as

bactérias acetogênicas utilizadoras de metano. As primeiras promovem a oxidação anaeróbia dos AGV a acetato. As reações envolvidas não são termodinamicamente favoráveis e só ocorrem quando a concentração de acetato, mais especificamente a pressão parcial de H_2 é mantida a níveis reduzidos. As segundas, existentes em menor número, são capazes de produzir acetato a partir de CO_2 e H_2 contribuindo assim para uma baixa pressão de hidrogênio no sistema. A reação envolvida é termodinamicamente favorável (CCE, 2000).

4. Metanogênese

A metanogênese é a última etapa da digestão anaeróbia e considerada a mais importante e sensível, onde o biogás (CH_4 , CO_2 e outros gases) é formado principalmente a partir de acetato, dióxido de carbono (CO_2) e gás hidrogênio (H_2) pelas áqueas metanogênicas. Algum metano extra é produzido na conversão do dióxido de carbono e hidrogênio produzidos na acetogênese. Enquanto a taxa de degradação de bactérias acetogênicas na etapa anterior e das metanogênicas forem praticamente as mesmas, a atividade metabólica do estágio metanogênico é garantido (GERARDI, 2003; CHERNICHARO, 1997).

Segundo Gerardi (2003), existem dois tipos de bactérias (arqueas) metanogênicas:

- hidrogenotróficas: produzem metano a partir do H_2 e CO_2 e são responsáveis por cerca de 30% do metano formado.
- acetoclásticas: são responsáveis por 70% do metano formado e também importantes no controle do pH, pois ao removerem o ácido acético, produzem CO_2 que se dissolve no meio formando uma solução tampão de bicarbonatos.

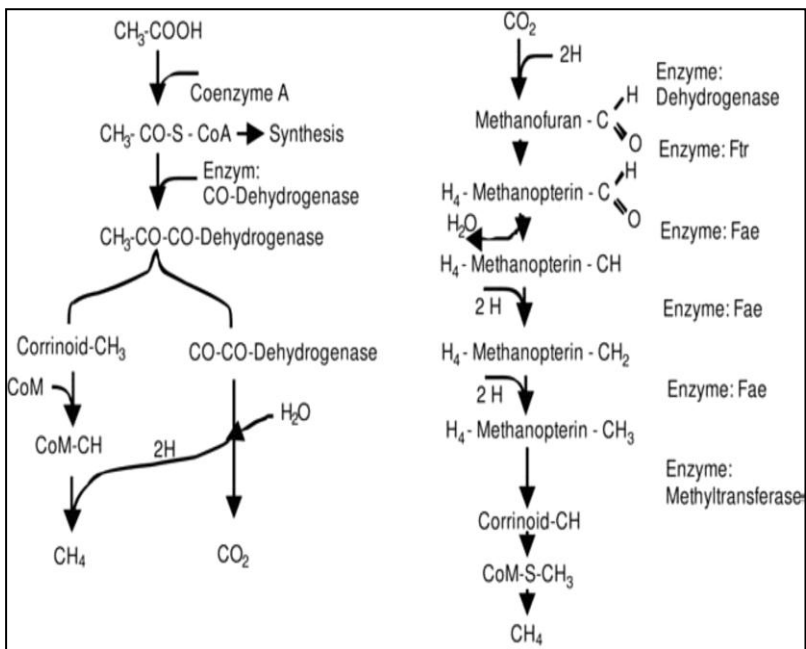


Figura 2 - formação do metano a partir do acetato (esquerda) e do dióxido de carbono (direita) fonte: DEUBLEIN & STEINHAUSER, 2008.

As bactérias responsáveis pela produção de metano através do CO_2 e do hidrogênio crescem de forma mais rápida do que aquelas que utilizam o acetato (gênero *Methanosarcina* e *Methanosaeta*) e são muitas vezes limitantes na produção de metano (PIRES, 2009).

3.1.2. Requisitos Ambientais

Estas bactérias anaeróbias são extremamente sensíveis a mudanças no meio, como temperatura e pH. As bactérias produtoras do biogás são mesofílicas, vivem entre 35 a 45 °C (Figura 3) e são sensíveis a alterações de temperatura. Variações bruscas de temperatura fariam com que as bactérias metanogênicas não sobrevivessem, o que

acarretaria na diminuição considerável da produção de biogás (SOSA, CHAO, RIO, 2004).

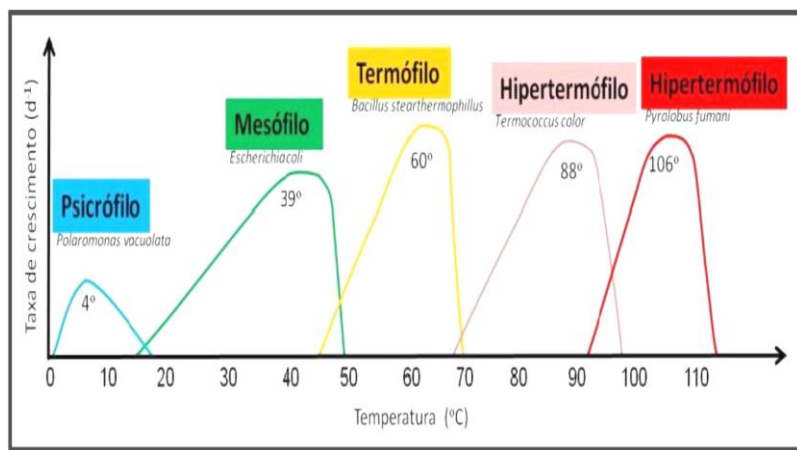


Figura 3 - classes de microrganismos de acordo com a temperatura. Fonte: adaptado de MADIGAN *et al.* (1996) apud LEITE (2011)

Como todas as operações bioquímicas, macronutrientes (nitrogênio e fósforo) e micronutrientes (minerais) são necessários aos processos anaeróbios para suporte a síntese de nova biomassa, sendo os seguintes nutrientes, em ordem decrescente de importância, necessários a estimulação nutricional de microorganismos metanogênicos: nitrogênio, enxofre, fósforo, ferro, cobalto, níquel, molibdênio, selênio, riboflavina e vitamina B12 (CHERNICHARO, 2007).

Para cada grupo de microrganismos existe uma faixa de pH ótimo. As arqueas metanogênicas são extremamente sensíveis ao pH e seus valores ótimos estão entre 6,5 e 7,2. Durante a digestão anaeróbia a produção de ácidos orgânicos voláteis tende a diminuir o pH, porém esta redução é amenizada através da produção de dióxido de carbono, amônia e bicarbonato (alcalinidade) pelas bactérias metanogênicas (APPELS *et al.*, 2008).

Para um processo ideal de fermentação, vários parâmetros devem ser levados em consideração e ser controlados. Além disso, os

requisitos ambientais das bactérias fermentativas, pela qual a hidrólise e a acidificação dos substratos ocorrem, diferem dos requisitos dos microorganismos produtores de metano (DEUBLEIN & STEINHAUSER, 2008).

Tabela 1 - requisitos ambientais relacionados à produção de metano.

Parâmetro	Hidrólise/Acidogênese	Produção de Metano
Temperatura	25 - 35°C	Mesofílico: 32 - 42°C Termofílico: 50 - 58°C
pH	5,2 - 6,3	6,7 - 7,5
Relação C:N	10 - 45	20 - 30
Teor de MS	< 40% MS	< 30% MS
Potencial Redox	+400 a -300mV	< -250mV
Relação C:N:P:S	500:15:5:3	600:15:5:3
Oligo Elementos	Sem requisitos especiais	Essencial: Ni, Co, Mo, Se

Fonte: adaptado de DEUBLEIN & STEINHAUSER, 2008.

3.2. Biogás

3.2.1. Histórico do Biogás

Atribui-se o nome de biogás a combinação de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e outros gases constituintes, produzidos pela digestão anaeróbia de hidrocarbonetos. Por muitos anos, o biogás foi um produto "perdido" do sistema de digestão anaeróbia de lodo, era simplesmente queimado para evitar danos pessoais (WALSH et al., 1988).

O gás foi descoberto por Shirley, em 1667. No entanto, foi só um século mais tarde que Volta reconheceu a presença de metano no gás dos pântanos. Já no século XIX, Ulysse Gayon, aluno de Louis Pasteur, realizou a fermentação anaeróbia de uma mistura de estrume e água, a 35°C, conseguindo obter 100 litros de gás por m³ de matéria. Em 1884, Louis Pasteur, ao apresentar à Academia das Ciências os trabalhos do

seu aluno, considerou que esta fermentação poderia constituir uma fonte de energia para aquecimento e iluminação, devido à presença de metano, o hidrocarboneto de menor cadeia (um átomo de carbono), principal componente do gás natural e de elevado poder calorífico (CETESB).

Os primeiros países a utilizarem o processo de biodigestão, de forma mais intensa e com finalidade energética foram a Índia e a China, nas décadas de 50 e 60, sendo que esses países e outros, geralmente do terceiro mundo, desenvolveram seus próprios modelos de biodigestores (NOGUEIRA, 1986 *apud* POMPERMAYER & JÚNIOR, 2000). O primeiro estudo de aproveitamento do gás, em uma pequena planta, com o uso de estrume e outros materiais foi justamente na Índia em 1941 (ROSS; DRAKE, 1996).

A partir de 1960, a digestão anaeróbia passou a ser pesquisada com caráter mais científico, havendo então, grandes progressos quanto à compreensão dos fundamentos do processo e também de projetos de biodigestores e equipamentos auxiliares (PECORA, 2006).

3.2.2. Composição e Características do biogás

O biogás resulta da decomposição anaeróbia da matéria orgânica, sendo constituído por uma mistura de gases como o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2), com vestígios de hidrogênio (H_2), azoto (N_2) e sulfureto de hidrogênio (H_2S), entre outros (MONTE, 2010). A Tabela 2 apresenta a constituição do biogás.

Tabela 2 - Concentração dos gases que constituem o biogás

Componente	Teor em Volume
Metano (CH ₄)	50 a 75%
Dióxido de Carbono (CO ₂)	25 a 40%
Hidrogênio (H ₂)	1 a 3%
Nitrogênio (N ₂)	0,5 a 2,5%
Oxigênio (O ₂)	0,1 a 1%
Gás Sulfídrico (H ₂ S)	0,1 a 0,5%
Amônio (NH ₃)	0,1 a 0,5%
Monóxido de Carbono (CO)	0 a 0,1%
Água (H ₂ O)	Variável

Fonte: adaptado de PIRES, 2000 apud PAULA JR., 2003.

As principais características dos gases de maior interesse na formação do biogás são as seguintes (ANDREOLI et al., 2001; PAULA JR., 2003):

- Metano (CH₄): inodoro, incolor e inflamável. O limite inferior de explosão (LIE) é a concentração mínima de metano necessária (5%) para fazer explodir uma mistura metano/ar exposta a uma fonte de ignição. O limite superior de explosão (LSE) é de 15%. A densidade relativa do metano é inferior à do ar (0,55), sendo facilmente dispersado. Não é tóxico, embora em concentrações elevadas possa reduzir a concentração de ar a níveis asfíxiantes.
- Gás carbônico (CO₂): inodoro, incolor e não inflamável. Densidade relativa superior à do ar (1,53), sendo asfíxiante em concentrações acima de 2%. O gás carbônico, em proporção significativa (25% a 40%), ocupa boa parte do volume útil e obriga, quando não suprimido, o aumento das capacidades de armazenamento.

- Gás sulfídrico (H_2S): incolor, inflamável e com cheiro característico de ovo podre. É irritante e asfíxiante, em concentrações superiores a 1% inibe o sistema olfativo e provoca inconsciência. Densidade relativa próxima ao ar (1,19), LIE de 4,3% e LSE de 43,5%. Além disso, o gás sulfídrico é corrosivo, atacando materiais como o cobre, o latão e o aço, dependendo de sua concentração.

Como qualquer outro gás, as características do biogás dependem da pressão, temperatura, umidade, concentração de metano e concentração de gases inertes e/ou ácidos (ALVES, 2000).

O gás metano é o combustível do biogás, que será mais puro quanto maior for seu teor, estando seu poder calorífico diretamente relacionado com a quantidade existente na mistura gasosa (PROSAB).

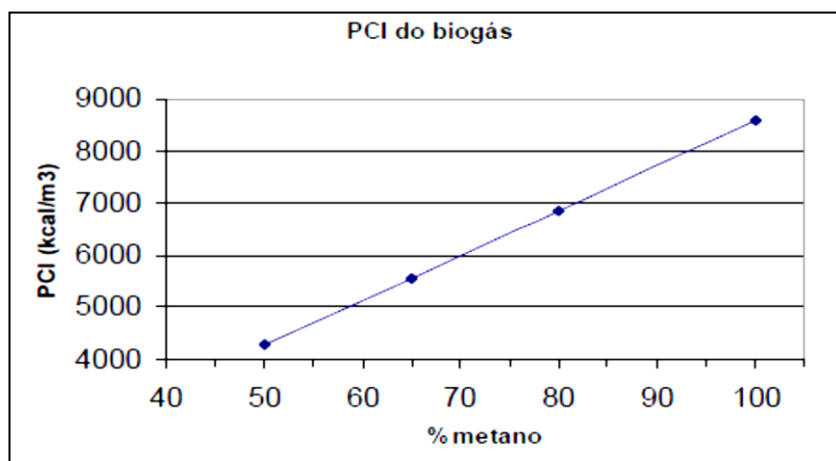


Figura 4 - Poder calorífico inferior por concentração de metano. Fonte: adaptado PAUSS (1987) apud LIMA (2005)

Portanto, a presença de substâncias não combustíveis no biogás, prejudica o processo de queima tornando-o menos eficiente uma vez que, presentes na combustão absorvem parte da energia gerada. À medida que se eleva a concentração de impurezas, o poder calorífico do biogás torna-se menor. (ALVES, 2000)

O gás carbônico e o gás sulfídrico devem receber atenção especial. São considerados como o principal problema na viabilização de seu armazenamento e na produção de energia, interferindo principalmente na qualidade do biogás, acarretando problemas de corrosão no sistema de condução do biogás até sua transformação como fonte de energia elétrica ou térmica, necessitando de processos de tratamento (MAGALHÃES, 1986). A purificação e o tratamento do biogás, segundo Coelho et al. (2006) aumenta o poder calorífico, rendimento térmico e elimina a característica corrosiva devido ao gás sulfídrico.

3.3. Tecnologias de conversão energética

No Brasil, por conta da matriz energética estar fundamentada na energia hídrica, não se incentivou da mesma forma a geração de novas formas de energia elétrica. Além disto, o próprio setor privado manifestou interesse limitado em tais investimentos oriundos de fontes diversas das tradicionais por conta de uma série de particularidades como: o elevado custo do capital nacional; limitada capacidade para o desenvolvimento de projetos de financiamento externo; limitadas fontes de pesquisas tecnológicas; e restrições de barreiras regulatórias, principalmente porque as fontes renováveis (como no caso do biogás) geralmente transitam por diversos âmbitos da administração pública (MMA, 2005).

A utilização do biogás como combustível contempla várias formas de uso, desde motores a explosão interna, passando por aquecimento de caldeiras e fornos e, ainda, podendo ser utilizado em turbinas a gás ou em microturbinas. Mas, para que estes usos possam ocorrer é necessário identificar a vazão, composição química e poder calorífico do biogás gerado, sendo estes os parâmetros que determinam o real potencial de geração de energia tanto na forma de energia elétrica quanto na forma de calor e trabalho. (Coelho et al., 2006)

Além disso, a quantidade de energia resultante da produção de biogás em sistemas de tratamento anaeróbio depende da quantidade adequada de biomassa ativa no reator anaeróbio. (INCE et al., 2000)

3.3.1. Energia Elétrica

No caso da transformação em energia elétrica, a energia química contida nas moléculas do biogás é convertida em energia mecânica por um processo de combustão controlada. Essa energia mecânica ativa um gerador que a converte em energia elétrica. (FIGUEIREDO, 2007)

3.3.1.1. Turbina a Gás

Segundo Monte (2010), a designação turbina a gás aplica-se a um conjunto constituído por três equipamentos básicos:

- compressor - que tem a função de aumentar a pressão do ar admitido para a combustão;
- câmara de combustão - é o local onde ocorre a combustão da mistura ar-combustível;
- turbina - equipamento que converte a energia libertada pela combustão em potência mecânica, sendo composta por um rotor dotado de pás ligadas a um eixo que gira sobre um conjunto de mancais.

Estas turbinas funcionam no ciclo termodinâmico de Brayton. O ar comprimido é injetado na câmara de combustão fornecendo o oxigênio para a queima do combustível. Esta reação exotérmica à alta pressão transfere a energia química do combustível para os gases elevando sua temperatura. O gás resultante é expandido na turbina, de onde se extrai a energia mecânica para acionamento do compressor e da carga acoplada ao eixo. Quanto mais elevada for a temperatura e a pressão dos gases na entrada do primeiro estágio da turbina, e quanto mais reduzida for a temperatura dos gases de exaustão, maior será a eficiência da turbina a gás (COSTA, 2006).

3.3.1.2. Microturbinas a Gás

As microturbinas Foram, inicialmente, construídas para aplicações em transporte como motores de ônibus e turbinas de aviões e, posteriormente, aplicadas em sistemas de geração de energia elétrica e cogeração (GOMES et. al., 2001).

Nas microturbinas, o ar é aspirado e forçado para o interior da turbina a alta velocidade e alta pressão para ser misturado ao combustível e posteriormente queimado na câmara de combustão. Controla-se o processo de queima para se obter a máxima eficiência e baixos níveis de emissão. Os gases produzidos na queima sofrem expansão nas palhetas da turbina, produzindo trabalho. Os gases não aproveitados são exauridos para a atmosfera (PECORA, 2006).

3.3.1.3. Motores de Combustão Interna

O motor de combustão interna pode ser de ciclo Otto ou ciclo Diesel. O motor realiza trabalho queimando uma mistura de vapor e combustível dentro de um cilindro. O trabalho mecânico é gerado com a transformação do movimento retilíneo do pistão em circular por meio de um virabrequim. É um mecanismo amplamente utilizado, por ser um processo prático e apresenta grande durabilidade (CORREA, 2003).

O ciclo Otto e o ciclo Diesel são muito parecidos. A diferença principal está no processo de adição de calor, visto que o Otto é isocórico, ou seja, ocorre a volume constante e o Diesel é isobárico, ocorre à pressão constante (CASTRO, 2006).

3.3.2. Cogeração

Nos casos em que há cogeração de energia, em que o biogás é usado em motores ou turbinas para gerar eletricidade, tem sido possível aproveitar o calor residual gerado nestas máquinas para satisfazer a necessidade de aquecimento. A temperatura na exaustão dos gases nos motores de combustão interna é aproximadamente 500°C, e nas microturbinas até 300°C (JORDÃO & PESSOA, 2009).

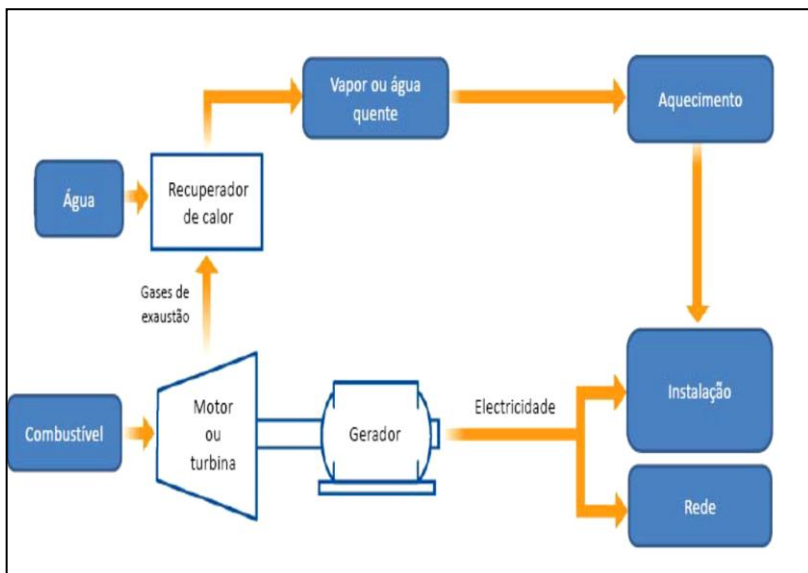


Figura 5 - Representação de um sistema de cogeração por motogerador e por turbina a gás. Fonte: MONTE, 2010

As empresas que utilizam o biogás proveniente do esgotamento sanitário podem adotar o sistema de cogeração de energia com utilização dos gases de exaustão para aquecimento dos digestores e do secador de lodo, aumentando a eficiência do processo com concomitante redução de custos de instalação e possibilidade de comercialização do excedente de eletricidade (CENBIO, 2001).

3.3.3. Comparação de tecnologias

Tabela 3 - Tecnologias para geração de energia a partir do biogás.

Tecnologia	Vantagens	Desvantagem
Motor de Combustão Interna.	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnologia de uso comum; • Rápida instalação; • Modularidade do sistema; • Diversidade de fornecedores de equipamentos; • Eficiência em carga total e parcial. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensionamento do compressor de biogás.
Turbina a gás	<ul style="list-style-type: none"> • Sem formação de condensados; • Confiabilidade mecânica; • Combustão completa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto investimento inicial; • Sensibilidade a partículas e impurezas; • Baixa eficiência dada à energia parasitária de compressor e perda de calor nos gases de exaustão.
Caldeiras	<ul style="list-style-type: none"> • Pequeno tamanho da instalação; • Baixo custo de manutenção. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto investimento inicial; • Biogás a alta pressão; • Geração de condensados; • Baixa eficiência a carga parcial.
Micro-turbinas	<ul style="list-style-type: none"> • Modularidade; • Alta confiabilidade mecânica; • Facilidade de interconexão com redes de distribuição. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa potência disponibilizada; • Baixo rendimento; • Necessidade de tratamento do biogás; • Alta pressão mínima de entrada do biogás.
Células a combustível	<ul style="list-style-type: none"> • Excelente desempenho ambiental. 	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibiliza baixa potência; • Tratamento do biogás; • <u>Alto investimento.</u>

Fonte: GARCÍA, 2006

3.4. Biogás e as mudanças climáticas

Antigamente, era comum o simples lançamento dos gases, na atmosfera sem a devida preocupação com o meio ambiente. O conhecimento dos malefícios causados pelo lançamento destes gases (destruição da camada de ozônio, efeito estufa) gerou uma preocupação

ambiental, passando a se recomendar a queima do gás gerado. A última revisão da Norma Brasileira, de 2009, prevê que o biogás se não aproveitado, seja queimado, enquanto que na versão de 1975 nada se recomendava sobre este tema (JORDÃO & PESSOA, 2009).

A queima do biogás evita impactos negativos ao meio ambiente e à sociedade, uma vez que este gás contribui para o agravamento do efeito estufa por meio da emissão de metano para atmosfera. Além disso, provoca odores desagradáveis pela emissão de gases fétidos e tóxicos, devido à concentração de compostos de enxofre presentes no gás (PECORA et al., 2008).

O fenômeno da absorção exagerada da radiação, ou o aumento desproporcional do "efeito estufa", tem sido objetivo de continuados estudos e reuniões entre países, como as que ocorrem no âmbito da Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento e da Organização Meteorológica Mundial, destacando-se o Painel Intergovernamental para as Mudanças Climáticas (IPCC). Segundo o IPCC, a maior parte do aquecimento dos últimos 50 anos é devido a um aumento dos gases emitidos de "efeito estufa" (JORDÃO & PESSOA, 2009).

4. METODOLOGIA

Este trabalho de conclusão de curso se insere em uma pesquisa iniciada por Wanderli Rogério Moreira Leite em sua dissertação de mestrado intitulada "Digestão anaeróbia mesofílica de lodo adensado de estação de tratamento de esgoto" apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina. A pesquisa tem sido desenvolvida no Laboratório de Efluentes Líquidos e Gasosos do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC.

Neste trabalho será calculada a quantidade de energia gerada pelo biogás produzido por um sistema piloto de digestão anaeróbia de lodo de ETE.

Inicialmente será realizada uma análise exploratória e descritiva dos dados quantitativos e qualitativos de biogás obtidos na pesquisa supracitada. Os dados obtidos serão utilizados nos cálculos de produção de energia a partir do biogás. A autossuficiência energética do digestor será avaliada na sequência.

4.1. Projeto Piloto

O digestor anaeróbio está instalado na ETE Insular de Florianópolis, a ETE é propriedade da Companhia de Águas e Saneamento de Santa Catarina. A estação possui sistema de tratamento de esgotos composto por gradeamento, caixa de areia, seletor biológico, câmara de desnitrificação, 2 tanques de aeração prolongada, 3 decantadores secundários, unidade de desinfecção do efluente, 2 adensadores de lodo e unidade desaguadora. A vazão média é de 300L/s, atendendo uma população de aproximadamente 130.000 habitantes.

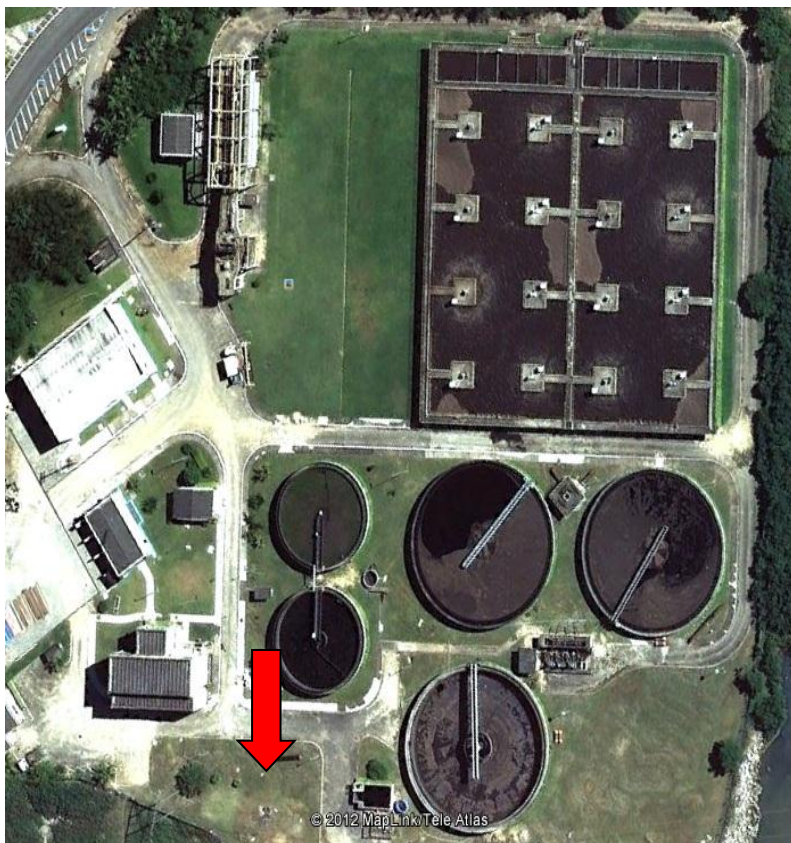


Figura 6 - Localização do digestor na ETE Insular. Fonte: Google Earth, 2012.

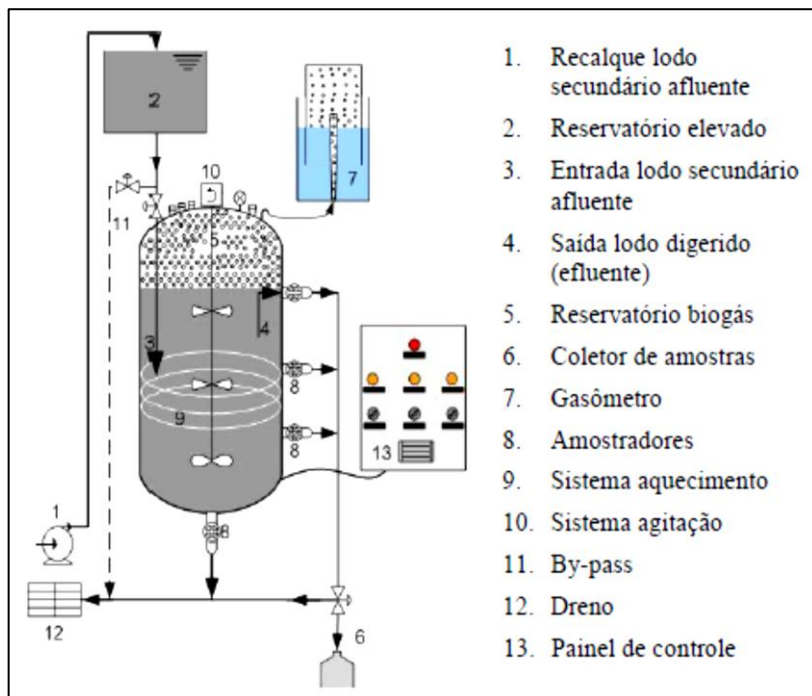


Figura 7 - Digestor Anaeróbico Piloto. Fonte: LEITE, 2011

Informações detalhadas a respeito do sistema piloto e da medição quantitativa e qualitativa do biogás gerado pelo sistema são encontradas em Leite (2011).

4.2. Análise descritiva dos dados de biogás

Serão analisados 67 dados de biogás referentes à operação do sistema piloto de digestão anaeróbia de lodo entre os meses de agosto do ano de 2010 a fevereiro do ano de 2011. Para o tratamento dos dados serão levadas em consideração as estratégias operacionais adotadas na operação do digestor neste período.

O software Excel 2010 será usado para tratar estatisticamente os dados brutos de biogás, assim como os para realização dos cálculos e

elaboração de gráficos (dispersão, diagramas de caixa, gráficos de barras, correlações, etc.).

As médias e desvios padrão (dp) considerarão o número de dados obtidos, relativamente ao funcionamento do digestor. Nas tabelas desta pesquisa será inserida uma coluna denominada “n” para apresentar o número de dados obtidos em cada condição operacional.

4.3. Cálculos de energia

Os resultados da análise descritiva serão utilizados na conversão energética do biogás. Considerando as vantagens das diferentes tecnologias de transformação de biogás em energia, será investigado o uso da turbina a gás para esta conversão. Segundo García (2006), Esta tecnologia tem sido amplamente utilizada para a produção de energia elétrica uma vez que esta tecnologia oferece facilidades de instalação e manutenção e há abundância de provedores destes equipamentos no mercado.

4.3.1. Energia Elétrica

4.3.1.1. Energia elétrica oriunda do biogás

Para a determinação da energia elétrica produzida nas turbinas, considerou-se a vazão diária do biogás, o poder calorífico e o rendimento global da transformação em energia elétrica. A Tabela 4 resume as condições adotadas para o cálculo.

Tabela 4 - Parâmetros utilizados para produção de energia elétrica.

	Vazão Diária	Poder Calorífico	Rendimento
Unidade	m ³ /dia	KJ/m ³	%
Valor	Valor diário	22400	30

Fonte: JORDÃO & PESSOA (2011)

A partir da equação 1 será determinada a quantidade de energia produzida.

$$E = Q \times Pc \times n$$

Eq.1

Na qual:

E = Potencial de eletricidade disponibilizado (KJ/dia)

Q = Vazão do biogás (m³/dia)

Pc = Poder Calorífico do biogás (KJ/m³)

n = Rendimento global da transformação em energia elétrica – turbina a gás (%)

4.3.1.2. Energia necessária para manter a temperatura mesofílica.

Conforme citado anteriormente a operação do digestor ocorre em condições controladas de temperatura mesofílica (35°C). Desta forma será avaliada a possibilidade de utilização de energia elétrica para acionamento da resistência elétrica e consequente manutenção da temperatura de operação, conforme apresentado na equação 2.

$$q = m \times \Delta t \times cL$$

Eq.2

Onde:

q = energia necessária para o digestor manter o lodo a 35°C
(J/dia)

m = massa de lodo afluente ao digestor (Kg/d)

Δt = diferença de temperatura entre o lodo afluente e o interior do reator (°C)

cL = calor específico do lodo (J/Kg.°C)

De acordo com Metcalf & Eddy (2003), o calor específico do lodo utilizado nos cálculos foi de 4200 J/Kg.°C

Por considerar a diferença de temperatura entre o lodo afluente e o interior do reator, serão analisados dois cenários (verão e inverno), sendo a média das diferenças de temperatura do verão e o do inverno o valor utilizado no cálculo.

4.3.1.3. Estimativa da dissipação de energia

Em busca de um resultado consistente, que considere as perdas de energia do sistema, será determinada a dissipação de energia do digestor na forma de calor. Para reduzir as perdas, e aumentar a eficiência do sistema o digestor é composto por um material isolante (fibra cerâmica) com 25mm de espessura. Os cálculos relacionados à perda do sistema (convecção, radiação e condução) foram baseados em INCROPERA & DEWITT (2008).

4.3.1.4. Perda de calor pelas paredes laterais

A equação 4 representa a estimativa da perda de calor pelas paredes laterais do digestor.

Cálculo da resistência das paredes laterais do digestor:

$$R1 = \frac{1}{2 \times \pi \times Lc} \left[\frac{1}{(hrad \times Re) + (hout \times Re)} + \frac{\ln Re/Ri}{K} \right] \quad \text{Eq.3}$$

Onde:

R1 = resistência do digestor – paredes laterais (K/W)

Lc = altura do digestor (m)

hrad = coeficiente de troca de calor por radiação (W/m².K)

hout = coeficiente de troca de calor por convecção (W/m².K)

Re = raio externo do digestor (m)

Ri = raio interno do digestor (m)

K = condutividade térmica do isolante presente no digestor (W/m.K)

Cálculo da energia dissipada na forma de calor pelas paredes laterais do digestor:

$$q1 = \frac{(Tin - Tout)}{R1} \quad \text{Eq.4}$$

Sendo:

(W) q_1 = energia dissipada na forma de calor pelas paredes laterais
 T_{in} = temperatura interna do digestor (K)
 T_{out} = temperatura ambiente onde se encontra o digestor (K)
 R_1 = resistência do digestor – paredes laterais (K/W)

4.3.1.5. Perda de calor pela base do digestor

A equação 6 representa a estimativa da perda de calor pelo fundo do digestor.

$$R_2 = \left[\frac{1}{(h_{rad} \times \pi \times R_e^2 \times L) + (h_{out} \times \pi \times R_e^2 \times L)} + \frac{1}{K \times \pi \times R_i^2} \right] \quad \text{Eq.5}$$

Onde:

R_2 = resistência do digestor – base (K/W)
 L = espessura do isolante (m)
 h_{rad} = coeficiente de troca de calor por radiação (W/m².K)
 h_{out} = coeficiente de troca de calor por convecção (W/m².K)
 R_e = raio externo do digestor (m)
 R_i = raio interno do digestor (m)
 K = condutividade térmica do isolante presente no digestor (W/m.K)

Cálculo da energia dissipada na forma de calor pela base do digestor:

$$q_2 = \frac{(T_{in} - T_{out})}{R_2} \quad \text{Eq.6}$$

Sendo:

(W) q_2 = energia dissipada na forma de calor pela base do digestor
 T_{in} = temperatura interna do digestor (K)
 T_{out} = temperatura ambiente onde se encontra o digestor (K)
 R_2 = resistência do digestor – base (K/W)

Não será calculada a energia dissipada pelo tampa do digestor porque não há contato entre o fluido e esta parte.

A temperatura média no verão foi de 26°C e no inverno de 18°C. Para o cálculo das perdas utilizou a média desses dois valores.

4.3.1.6. Energia total dissipada

A energia total dissipada do sistema será a soma da energia dissipada pelas paredes laterais e a energia dissipada pela base do digestor, sendo assim representada pela equação 7.

$$q_{total} = q_1 + q_2$$

Eq.7

4.3.2. Balanço Energético

A partir dos resultados da energia bruta produzida, da perda de energia na forma de calor e da energia necessária para a operação do sistema, será realizado um balanço energético a fim de se verificar a autossuficiência do sistema. A Figura 8 esquematiza o balanço de massa no digestor.

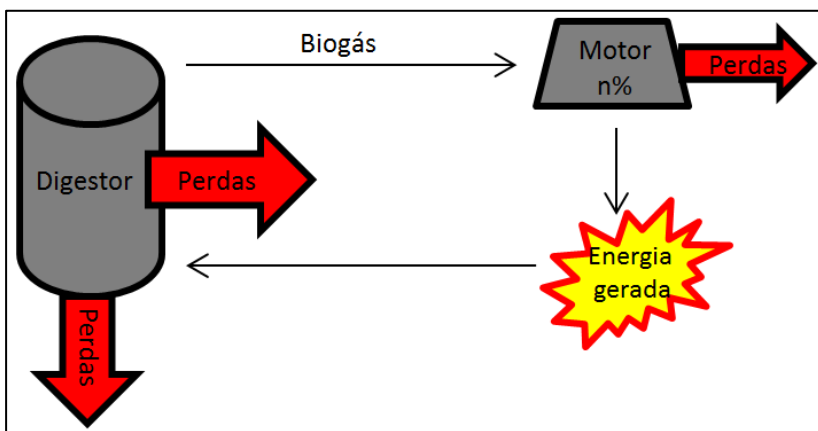


Figura 8 - Representação do Balanço energético no digestor

$$A = E - q_{total}$$

Eq.8

Se $A \geq q \rightarrow$ É Autossuficiente

Se $A < q \rightarrow$ Não é autossuficiente

Sendo:

A = autossuficiência do digestor (W)

E = Potencial energético disponibilizado (W)

q_{total} = Energia total dissipada no digestor (W)

q = energia necessária para o digestor manter o lodo a temperatura de 35°C (W)

4.3.3. Cogeração

A cogeração é a utilização simultânea de duas formas benéficas de energia (eletricidade e calor). Os gases exauridos a altas temperaturas na queima do biogás para geração da energia elétrica são reaproveitados na forma de energia térmica. (JORDÃO & PESSOA, 2011).

Desta forma o sistema apresenta um novo rendimento e consequentemente gera maior quantidade de energia. Para o cálculo do novo rendimento é utilizada a equação 9.

$$nc = ne + nt$$

Eq. 9

nc = rendimento cogeração (%)

ne = rendimento da conversão em energia elétrica – turbina a gás (%)

nt = rendimento da conversão em energia térmica – turbina a gás (%)

De acordo com Jordão & Pessoa (2011), será adotado neste trabalho para turbina a gás uma eficiência térmica de 50%. Como já visto anteriormente a eficiência elétrica é de 30%.

Com o resultado da equação 9, determina-se um novo potencial de energia disponibilizado, sendo:

$$E = Q \times Pc \times nc$$

Eq.10

4.4. Uso da energia gerada

4.4.1. Economia na conta de energia elétrica

Com base no consumo energético, mensal e anual (2010 e 2011), da estação de tratamento de esgotos Insular, calcular-se-á o quanto seria economizado em reais, se toda energia produzida no digestor fosse reutilizada na estação.

Será considerado o valor unitário do Kwh pago pela companhia de saneamento gerenciadora da estação nos anos de 2010 e 2011. As informações utilizadas foram obtidas da própria companhia e podem ser visualizadas no anexo A. A determinação da economia é obtida através do produto da energia gerada pelo digestor e o valor pago pelo Kwh de energia consumida.

4.4.2. Utilização da energia gerada

A energia gerada poderá ser aproveitada em diversos aparelhos domésticos. Com base em uma tabela de consumo, serão exemplificados na prática, quais aparelhos poderiam ser supridos pela energia gerada pelo digestor, e por quanto tempo isso seria possível. A tabela nos fornece o consumo mensal do aparelho baseado em x horas de uso por dia e y dias de uso por mês. A divisão deste consumo mensal do aparelho pelo potencial energético disponibilizado pelo digestor, nos fornece o tempo necessário de armazenamento de gás para que o aparelho possa ser suprido energeticamente. Em anexo está a tabela com os dados de consumo dos aparelhos domésticos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Análise descritiva dos dados

Ao todo, foram analisados 67 dados de biogás referentes à operação do sistema piloto de digestão anaeróbia de lodo entre os meses de agosto do ano de 2010 a fevereiro do ano de 2011.

5.1.1. Análise qualitativa

A Tabela 5 e a Figura 9 apresentam os dados e a análise qualitativa, da produção de biogás.

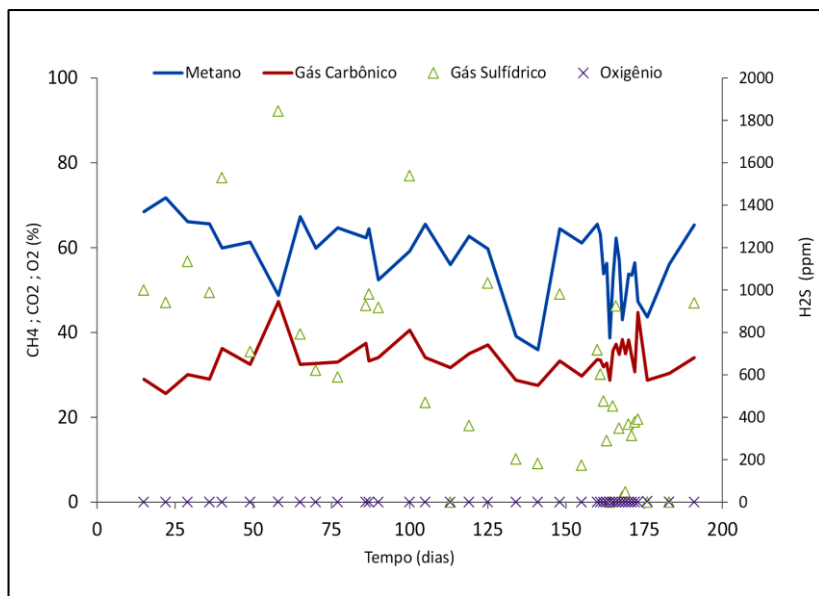


Figura 9- Qualidade do biogás produzido pelo digestor anaeróbio de lodo

Tabela 5 - Avaliação qualitativa do biogás produzido para as diferentes COV aplicadas no digestor

Avaliação qualitativa do biogás					
COV		n	Média	Mediana	Desvio Padrão
KgSTV.m ⁻³ .d ⁻¹		-	%	%	-
0,50	CH ₄	5	66,38	66,10	4,36
	CO ₂		29,96	29,00	3,88
	O ₂		0,14	0,11	0,13
1,00	CH ₄	2	55,03	55,03	8,90
	CO ₂		39,89	39,89	10,48
	O ₂		0,72	0,72	0,73
1,50	CH ₄	3	63,93	64,64	3,76
	CO ₂		32,73	32,70	0,27
	O ₂		0,07	0,06	0,07
2,50	CH ₄	5	60,78	62,33	5,28
	CO ₂		35,88	34,10	3,04
	O ₂		0,20	0,20	0,05
3,50	CH ₄	4	54,36	57,85	10,53
	CO ₂		33,13	33,35	3,66
	O ₂		0,19	0,20	0,06
4,50	CH ₄	3	53,82	61,10	15,61
	CO ₂		30,18	29,73	2,93
	O ₂		0,28	0,20	0,13
2,00	CH ₄	10	52,42	53,62	6,93
	CO ₂		34,92	34,53	4,67
	O ₂		0,68	0,27	1,03

Em relação à qualidade do biogás produzido, considerando o desvio padrão, observou-se que a concentração de CH₄ e gás carbônico no biogás não variou bruscamente durante o período de avaliação qualitativa, sendo a maior variação média de metano de aproximadamente 14% e a de CO₂ 10%. O percentual de metano foi decrescendo ao longo dos dias e das cargas aplicadas, sendo a máxima

porcentagem média de $66,38 \pm 4,36$ para uma COV de $0,5 \text{ KgSTV.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$.

Em relação ao oxigênio, sua concentração próxima a 0% já era esperada. FANTOZZI & BURATTI (2009), por exemplo, avaliaram a produção de biogás derivada do tratamento de diferentes substratos e em todos eles a concentração de oxigênio foi próxima à zero.

5.1.2. Análise quantitativa

A Tabela 6 e a Figura 10 apresentam os dados e as análises quantitativas, da produção do biogás.

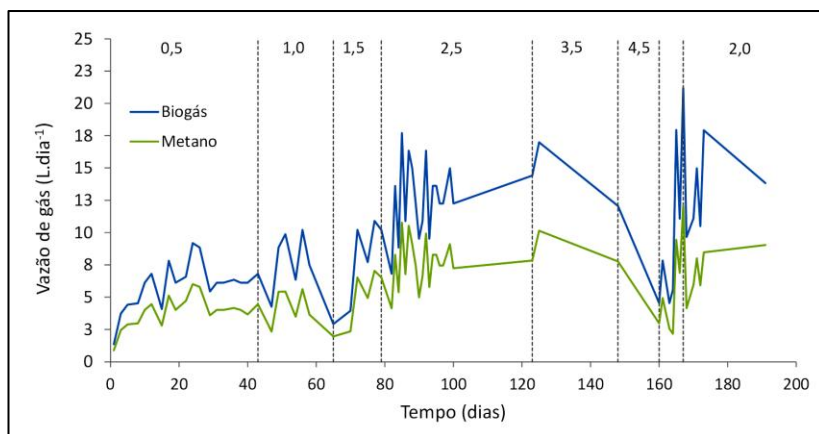


Figura 10 - Vazão de biogás e metano produzidos no digestor anaeróbio de lodo

Tabela 6 - Avaliação quantitativa do biogás produzido para as diferentes COV aplicadas no digestor

Avaliação quantitativa do biogás					
COV	Gás Avaliado	*n	Média	Mediana	Desvio Padrão
KgSTV.m ⁻³ .d ⁻¹		-	L.dia ⁻¹	-	-
0,50	Biogás	19	5,94	6,13	1,81
	CH ₄		3,90	4,01	1,19
1,00	Biogás	6	7,84	8,17	2,28
	CH ₄		4,33	4,54	1,36
1,50	Biogás	6	7,65	8,97	3,46
	CH ₄		4,89	5,73	2,23
2,50	Biogás	19	12,65	12,25	2,81
	CH ₄		7,68	7,45	1,81
3,50	Biogás	2	15,70	15,70	1,83
	CH ₄		8,99	8,99	1,63
4,50	Biogás	1	12,07	-	-
	CH ₄		7,78	-	-
2,00	Biogás	8	14,17	13,83	4,23
	CH ₄		7,67	8,02	2,60

*Número de dados obtidos em cada condição operacional

Com base no gráfico e na tabela, é possível perceber que com o incremento da carga orgânica volumétrica até 3,5 KgSTV.m⁻³.d⁻¹, a produção de biogás e de metano aumenta. Para a COV de 4,5 KgSTV.m⁻³.d⁻¹ observou-se uma redução na produção de biogás e consequentemente de metano. A maior vazão média de biogás se deu para uma COV de 3,5 KgSTV.m⁻³.d⁻¹, sendo 15,70 ± 1,83 L.dia⁻¹. Esse valor representa um aumento de 164% comparado à produção média mínima de biogás de 5,94 ± 1,81 L.dia⁻¹ no início da operação quando a carga orgânica volumétrica era de 0,5 KgSTV.m⁻³.d⁻¹.

Bruno & Oliveira (2008), em seu experimento com um reator piloto (UASB) de 10 Litros, para tratamento de águas residuárias,

obtiveram a máxima produção de metano de $0,71 \text{ L.dia}^{-1}$ para uma COV de $3,6 \text{ KgSTV.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$.

O digestor ficou 10 dias sem receber carga (intervalo entre COV $4,50$ e $2,00 \text{ KgSTV.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$), e durante esse período notou-se um incremento na produção de biogás, porém com uma porcentagem cada vez menor de metano. Este dado indica que a COV de $4,5 \text{ KgSTV.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$ se configura como uma carga orgânica acima da capacidade ótima do digestor para produção de biogás.

A média total de produção de biogás e metano, para todo o período experimental, foi de $9,70$ e $5,81 \text{ L.dia}^{-1}$, respectivamente. Esses valores estão dentro de uma faixa esperada, e próxima ao encontrado por outros autores (Prado & Campos, 2008; NECZAJ et al, 2012). Em condições normais de temperatura e pressão a média da produção de biogás é $8,60 \text{ L.dia}^{-1}$. Porém para efeito dos cálculos e análise dos resultados será considerado o valor das medições e condições observadas em campo.

5.2. Geração de energia elétrica

5.2.1. Potencial de energia elétrica disponível

Para a conversão do biogás em energia, considerou-se a utilização de uma tecnologia amplamente utilizada, a turbina a gás. Sua eficiência, já citada anteriormente, é de 30%.

O poder calorífico do biogás utilizado para os cálculos foi de 22400 KJ/m^3 (JORDÃO & PESSOA, 2011).

A Tabela 7 fornece os valores de potencial de energia disponibilizado, em watts, por mês de monitoramento.

Tabela 7 - Potencial de energia disponibilizado por mês

Potencial de energia disponibilizado				
ano	mês	máx.	média	DP
2010	ago	0,55	0,36	0,15
	set	0,74	0,53	0,11
	out	0,82	0,57	0,23
	nov	1,43	0,99	0,23
	dez	1,37	1,27	0,15
2011	jan	1,45	0,73	0,40
	fev	1,71	1,14	0,34

Nota: Valores em Watts

Os resultados contidos na tabela acima estão diretamente relacionados aos valores de quantidade de biogás produzido (Tabela 6), estando as duas maiores médias mensais de potencial de energia (1,14 e 1,27 W), associados aos dois maiores valores de produção de biogás (14,17 e 15,70 L.dia⁻¹). Os gráficos abaixo, demonstram essa relação entre a produção de biogás e o potencial de energia disponibilizado.

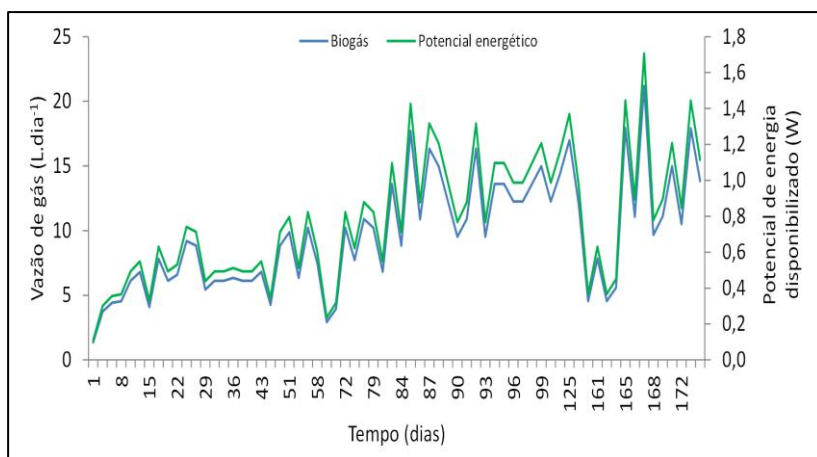


Figura 11 - Vazão de biogás x Potencial energético disponibilizado

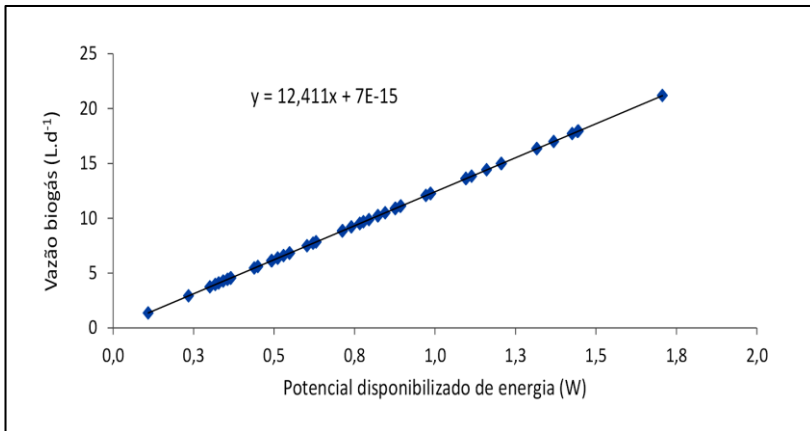


Figura 12 - Correlação entre vazão de biogás e potencial de energia disponibilizado

5.2.1. Energia dissipada

Para se ter uma estimativa real do valor energético obtido a partir do biogás produzido no digestor anaeróbio, fez-se necessário calcular a quantidade de energia dissipada na forma de calor pelo digestor.

Por se tratar de valores insignificantes, as perdas de energia na forma de calor por radiação foram desconsideradas. Com isso desconsiderou-se também as perdas pela tampa do digestor, uma vez que o lodo não tem contato direto com a tampa e a única forma de perda pela tampa seria por radiação.

Tabela 8 - Perda de energia do digestor na forma de calor

Local	Watts	KJ/dia
Paredes Laterais	13,99	1208,74
Base	0,04	3,37
Total	14,03	1212,11

Pode-se perceber que as perdas pelas paredes laterais do digestor são as mais significativas, devido a uma maior área de contato com o lodo e consequentemente com a superfície externa que está a uma temperatura inferior. Pelo mesmo motivo, justifica-se a baixa perda pela base do digestor, ou seja, contato menor com o lodo e a superfície externa.

5.2.2. Energia necessária ao funcionamento do digestor

O digestor possui uma resistência elétrica que mantém a temperatura do lodo a 35°C (mesofílica). Sendo as outras energias utilizadas para o funcionamento do digestor, irrisórias, comparada à da resistência elétrica, considerou-se essa energia utilizada pela resistência, à necessária ao funcionamento do digestor.

A diferença de temperatura entre o lodo afluyente e o meio reacional é utilizada no cálculo. Portanto, por Florianópolis ser uma cidade com estações bem definidas, foi calculada a energia necessária ao funcionamento do digestor no verão e no inverno, sendo a média o resultado utilizado.

Tabela 9 – Energia necessária ao funcionamento do digestor.

	Temp. Amb. Média (°C)	KJ/dia	Watts
Verão	26	6,89	0,08
Inverno	18	13,02	0,15
Média	22	9,96	0,12

Pode-se verificar que no inverno, para a resistência atingir e manter a temperatura mesofílica (35 °C) no digestor é necessária uma energia de 13,02 KJ/dia. No verão, por ser mais quente, apenas 6,89 KJ/dia.

A temperatura exerce forte influência na produção de biogás. Segundo Reichert (2005), os sistemas mesofílicos são muito sensíveis à variação da temperatura ambiente, podendo parar a geração de biogás no período de inverno em climas mais frios.

5.2.3. Balanço energético

Para verificar se o digestor é autossuficiente energeticamente, realizou-se o balanço energético considerando a energia necessária ao funcionamento do digestor, a energia produzida e as perdas de energia na forma de calor.

A energia produzida pelo biogás gerado no digestor é, em média, de 0,80 W ou 67,08 KJ/dia (Tabela 7). Sendo a energia dissipada na forma de calor igual a 14,03 W ou 1212,19 KJ/dia (Tabela 8), verifica-se que o digestor não é autossuficiente. Independente de quanto de energia o digestor necessita para manter a temperatura mesofílica, utilizando a tecnologia citada, as perdas energéticas são maiores do que a quantidade de energia teoricamente produzida. O digestor disponibilizou 59,8 kWh/m³ de gás produzido.

A Figura 13 ilustra a geração de energia através do biogás e as perdas do sistema.

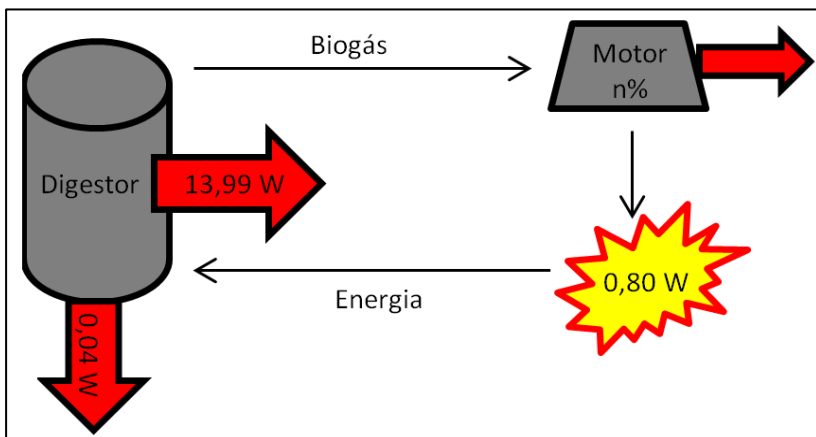


Figura 13 - Representação do balanço energético

Possivelmente, a baixa vazão de biogás é a principal causa para a insuficiência energética do digestor. Outro fator que contribui negativamente, é a localização do digestor. Por estar situado em uma cidade no sul do Brasil, onde no inverno as temperaturas são relativamente baixas, as perdas do sistema se intensificam, uma vez que as diferenças de temperatura são maiores.

O gráfico abaixo mostra a vazão necessária para que a autossuficiência fosse atingida.

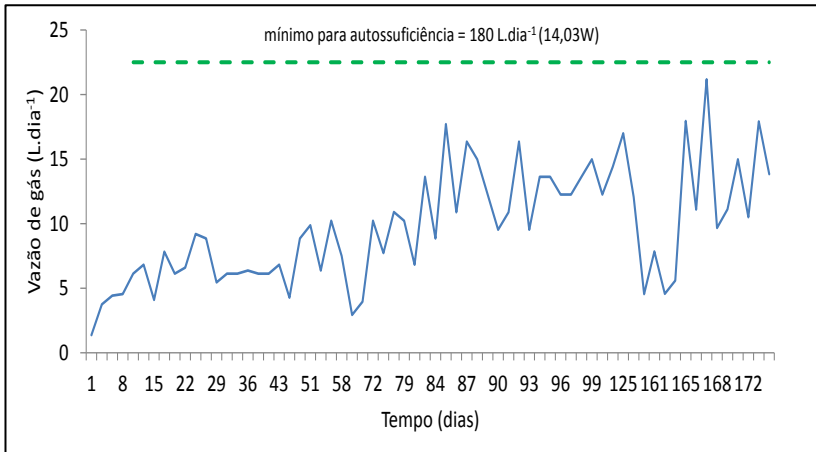


Figura 14 - Vazão de biogás necessária para autossuficiência

Um fator que aumentaria a quantidade de energia produzida, seria a utilização de um purificador de biogás, eliminando os gases “poluentes” e mantendo apenas o gás metano que possui um maior poder calorífico.

Purificadores de biogás tem sido utilizados para eliminar a umidade e principalmente o sulfeto de hidrogênio do biogás. Segundo Moura (2010), o biogás submetido a um alto índice de purificação, pode aumentar seu poder calorífico em até 140%. A Tabela 10 nos fornece valores de qualidade do biogás antes e após tratamento, em ensaio realizado pela empresa White Martins.

Tabela 10 - Qualidade do biogás antes e após tratamento

% do Volume ou ppm		
Compostos Químicos	Sem Purificação	Após Purificação
O ₂ (Oxigênio)	1,23%	0,89%
N ₂ (Nitrogênio)	15,50%	13,20%
CO ₂ (Dióxido de Carbono)	4,75%	4,07%
CH ₄ (Metano)	75,80%	80,80%
H ₂ S (Sulfeto de Hidrog.)	649 ppm	< 1,0 ppm
H ₂ O (Água)	2,62%	0,98%

Fonte: Adaptado de YAMASHITA, 2004 – Certificado de Análise, White Martins

Percebe-se através dos dados expostos, que o tratamento do biogás, de fato, diminui a umidade, a quantidade de gases poluente, aumentando a concentração de metano e consequentemente o poder calorífico.

5.3. Cogeração de energia

A cogeração de energia aproveita o calor residual gerado nas turbinas para satisfazer a necessidade de aquecimento. A temperatura na exaustão dos gases nas microturbinas é de até 300°C (JORDÃO & PESSOA, 2011).

Sendo assim um novo rendimento do sistema é obtido através da soma dos rendimentos da conversão em energia elétrica (30%) e o rendimento da conversão em energia térmica (50%), elevando a conversão do biogás em energia para 80%.

Segundo Ferrão (2001), sistemas de cogeração alcançam tipicamente uma eficiência de até 85%. Para Silveira (1994), sistemas de cogeração, utilizando motor de combustão interna, podem aproveitar de 50 a 70% da energia do combustível na forma de calor e de 23 a 30% na forma de eletricidade.

Com isso, além dos 0,80W gerados de energia elétrica, rende-se mais 1,34W de energia térmica.

O aproveitamento da energia térmica gerada a partir do calor residual poderia ser utilizada através de uma serpentina interna ao digestor. O vapor em altas temperaturas passaria pela serpentina para manter o lodo dentro do digestor à temperaturas mesofílicas. Outra possível forma de aproveitamento seria a utilização deste vapor nos leitos de secagem de lodos. O leito de secagem dos lodos utilizaria o calor do vapor para acelerar o processo de secagem.

A Figura 15 mostra a relação da média de potencial de energia disponibilizada (energia elétrica, térmica e a cogeração de energia), de acordo com os meses de operação.

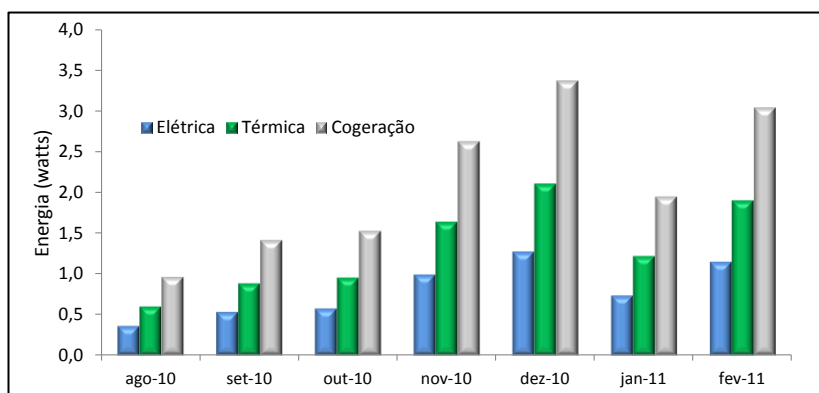


Figura 15 - Potencial de energia disponibilizado durante os meses de medição do biogás.

Mesmo aumentando o rendimento do aproveitamento de energia, com a cogeração, o digestor não atinge a autossuficiência energética. Reforçando a ideia de que a vazão do digestor é muito baixa.

5.4. Avaliação Econômica

5.4.1. Economia na conta de energia elétrica

De acordo com a casan, o gasto com energia elétrica nos anos de 2010 e 2011 se deram da seguinte forma:

- 1,27 reais por quilowatt hora em horário de ponta
- 0,21 reais por quilowatt hora em horário fora de ponta.

Sendo considerado horário de ponta das 17:30 horas às 20:30 horas.

Como já visto, o potencial de energia elétrica disponibilizada é de 0,80 watts. Multiplicando este valor por 24 horas que se tem em um dia e por 30 dias de um mês, seria disponibilizado 580 Wh/mês e aproximadamente 7,00 KWh em um ano.

Portanto, utilizando essa energia produzida pelo digestor na ETE em horário de ponta, seria possível uma economia de aproximadamente R\$ 9,00 reais em um ano. Utilizando o potencial disponibilizado pela cogeração, a economia seria de aproximadamente R\$ 15,00 reais/ano.

5.4.2. Utilização da energia gerada

Para exemplificação, o quadro abaixo simula a energia gerada pelo digestor aplicada em alguns aparelhos domésticos.

Tabela 11 - Aparelhos domésticos supridos pela energia gerada

Aparelho	Potência (W)	Dias/mês	Horas/dia	Consumo Mensal (KWh)	Energia Disponível (KWh)	Relação consumo/energia disponível
DVD	15	8	2	0,240	0,58	OK
LÂMPADA INCANDESCENTE	60	30	5	9,000	0,58	16
LAVADORA DE ROUPAS	147	12	1	1,764	0,58	3
IMPRESSORA	15	20	1	0,300	0,58	OK

Através da Tabela 11 percebe-se que um aparelho DVD funcionando 8 dias por mês, 2 horas por dia, pode ser suprido pela energia gerada pelo digestor. Já para suprir o consumo mensal de uma lavadora de roupas funcionando 12 dias, 1 hora por dia, seriam necessários 3 meses de armazenamento de biogás.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Analisando os dados de quantidade e qualidade do biogás, conclui-se que a carga orgânica que favorece a produção do gás no digestor piloto é próxima a $3,5 \text{ KgSTV.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$, sendo a maior vazão do biogás de $15,70 \pm 1,83 \text{ L.dia}^{-1}$. Porém, mesmo quando operado com esta carga, o digestor de lodo piloto, não foi autossuficiente – considerando tanto a geração de energia elétrica, como a cogeração –, ou seja, a energia dissipada na forma de calor (14,03 Watt) é maior do que a quantidade de energia produzida através da tecnologia escolhida (0,8 Watt).

A insuficiência energética está diretamente associada à baixa vazão de biogás e a alta perda de energia na forma de calor. Abaixo estão relacionadas algumas mudanças que aumentariam a vazão de gás e diminuiriam as perdas:

- Geometria do digestor piloto: quanto maior a área lateral, maior a perda de energia. Deve-se produzir um digestor de mesmo volume com menor área lateral.
- Isolante térmico: O digestor já possui um isolante (fibra cerâmica) com 25mm de espessura, seria interessante acrescentar um isolante em série para verificar a diminuição nas perdas. Exemplo: lã de vidro.
- Grandes amplitudes térmicas no inverno: quanto menor a temperatura do lodo afluyente, maior o gasto de energia para que a resistência elétrica mantenha o lodo interno ao digestor em temperaturas mesofílicas. Ou seja, se o mesmo experimento fosse feito no nordeste, o digestor necessitaria de menos energia para manter o lodo a 35°C .
- Utilização de um purificador de biogás: Como já explicado anteriormente, a utilização de um purificador de biogás, aumentaria o poder calorífico do mesmo e consequentemente aumentaria a eficiência do sistema (maior produção de energia).

Mesmo sendo um digestor piloto, com baixa vazão, seria possível suprir energeticamente aparelhos eletrônicos usualmente

encontrados em escritórios, refletindo em benefícios econômicos para a Casan.

Para trabalhos futuros seria interessante esse mesmo estudo em um digestor anaeróbio de lodo em escala real. Além disso, no intuito de melhorar a eficiência do sistema, cada item supracitado, serve como recomendação para continuar a pesquisa.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J. W. S. Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos. São Paulo, 2000. 142 p, (PIPGE/USP, M. Sc., Energia).

ANDREOLI, C. V. Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. Programa De Pesquisa Em Saneamento Básico (BRASIL). Curitiba: ABES, 2001. 257p.

ANTÃO, M. D. Aplicação da digestão anaeróbia na redução de volume de lodo de estação de tratamento de esgoto. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Florianópolis, 2011

APPELS, L.; BAEYENS, J.; DEGRE'VE, J.; DEWIL, R., Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. Progress in Energy and Combustion Science, Belgium vol. 34, pp. 755-781, 2008.

CABRAL, C. Valorização energética do biogás da digestão anaeróbia de resíduos pecuários. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Florianópolis, 2011

CASSINI, S. T. (COORD.). Digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento de biogás. Projeto PROSAB, Rio de Janeiro, 2003.

CASTRO, R. Energias renováveis e produção descentralizada. DEEC, Área Científica de Energia, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, 2006. – procurar

CENBIO. Geração de energia elétrica a partir de Biogás de Tratamento de Esgoto. USP/IEE/CENBIO – SABESP. Relatório técnico final. São Paulo, Junho de 2004.

COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; Silva, O. C.; Abreu, F. C. A conversão da fonte renovável biogás em energia. V Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, 31 de maio a 2 de julho de 2006, Brasília – DF.

CHERNICHARO, C. A. L. Reatores anaeróbios. 2 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. 380 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.5).

CORREA, A. S. A influência da folga de válvulas na geração de ruído e vibração no motor fire 999cc 8v. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, 2003.

COSTA, D. F. Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto. 2006. 194 p. Dissertação (Mestrado em Energia). Programa de Interunidades de Pós-graduação em Energia – PIPGE (EP/FEA/IEE/IF), Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. Biogas from waste and renewable resources. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008.

FERRÃO, P.; WEBER, F. (2001). COGERAÇÃO: UMA BORDAGEM SOCIOECONÔMICA, 1-7.

FIGUEIREDO, N. J. V. D. (2007). Utilização do biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica e iluminação a gás – Estudo de Caso. São Paulo. Universidade Mackenzie Presbiteriana.

GERARDI, M. H. The Microbiology of Anaerobic Digesters, 1ª ed., Wiley-Interscience (2003).

GOMES, E. E. B; COBAS, V. R. M.; NASCIMENTO, M. A. R.; LORA, E. E. S.; NETO, L. J. M. Aspectos econômicos e ambientais da aplicação de microturbinas a gás natural na geração distribuída. (Artigo). Escola Federal de Engenharia de Itajubá, EFEI, Itajubá, MG, 2001

INCE, B.; INCE, O.; ANDERSON, G.; ARAYICI, S. (2001).
ASSESSMENT OF BIOGAS USE AS AN ENERGY SOURCE FROM
ANAEROBIC DIGESTION OF BREWERY WASTEWATER

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. Fundamentos de transferência de
calor e de massa. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. Tratamento de esgotos domésticos.
ABES, 5ª edição, Rio de Janeiro, 2009

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. Tratamento de esgotos domésticos.
ABES, 6ª edição, Rio de Janeiro, 2011.

LEITE, W. R. M.. Digestão anaeróbia mesofílica de lodo adensado de
estação de tratamento de esgoto. 143 p. Dissertação (mestrado) -
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Ambiental. Florianópolis, SC, 2011.

LETTINGA, G.; HULSHOF, P. L. W.; ZEEMAN, G. Biological
Wastewater Treatment. Part I: Anaerobic wastewater treatment. Lecture
Notes. Wageningen Agricultural University, ed. January 1996.

LIMA, F. P. Energia no tratamento de esgotos: Análise tecnológica e
institucional para conservação de energia e o uso do biogás. 2005. 139p.
Dissertação de mestrado – Programa Interunidades de Pós- Graduação
em Energia. Universidade de São Paulo.

LOBATO, L. C. S. Aproveitamento Energético de Biogás Gerado em
Reatores UASB Tratando Esgoto Doméstico – Tese de Doutorado.
Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e
Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais UFMG.
2011

MAGALHÃES, A. P. T., – Biogás: um projeto de saneamento urbano,
1986

METCALF & EDDY. Wastewater Engineering: Treatment and reuse. 4ª
Ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

MONTE, M. M.Do. Contributo para o Estudo da Valorização Energética de Biogás em Estações de Tratamento de Águas Residuais. 2010. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2010.

NECZAJ, E.; BIEN J.; GROSSER, A.; WORVAG, M.; KACPRZAK, M. Anaerobic treatment of sewage sludge and grease trap sludge in continuous co-digestion. Global NEST.n. 02. p 141-148, 2012.

PAULA JÚNIOR, D.R. de et al. Estabilização anaeróbia de lodos. In: PROSAB - Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. Digestor de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás. Coordenação: Sérgio Túlio Cassini. 1. ed., cap. 3, p. 53-93. Vitória, ES, 2003.

PECORA, V.; FIGUEIREDO, N. J. V.; COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, M. S. G. (2008). BIOGÁS E O MERCADO DE CRÉDITOS DE CARBONO, 1-5.

PIRES, A. F. F. E. (2009). CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE ESTABILIZAÇÃO ANAERÓBIA E UTILIZAÇÃO DO GÁS PRODUZIDO. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

POMPERMAYER R. S., PAULA JR D.R.,(2000), Estimativa do potencial brasileiro de produção de biogás através da biodigestão da vinhaça e comparação com outros energéticos, .Anais 3. Encontro de. Energia no Meio Rural Setembro.

PRADO, M.; CAMPOS,C. Produção de biogás no tratamento dos efluentes líquidos do processamento de *Coffea arábica* em reator aneróbico UASB para o potencial aproveitamento na secagem do café. Ciência e Agrotecnologia, v. 32, n. 03, p. 938-947, 2008.

REICHERT, G. Aplicação da digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos: uma revisão. 23 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 18 a 23 de setembro de 2005. Campo Grande/MS

ROSS, C.C., DRAKE, T.J., The handbook of biogas utilization, U.S. Department of Energy Southeastern Regional Biomass Energy Program Tennessee Valley Authority, Muscle Shoals, Alabama, Second Edition, 1996.

SILVEIRA, J.L.; Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP; Cogeração Disseminada para Pequenos Usuários: Estudo de Casos para o Setor Terciário, Tese de Doutorado; 193p.; Campinas, SP; 1994.

SOSA, R.; CHAO, R.; RIO, del J. – Aspectos Bioquímicos e Tecnológicos de Tratamento de Resíduos Agrícolas com produção de Biogás, 2004. Souza, J. S. I.; Peixoto, A. M.; Toledo, F. F. – Enciclopédia Agrícola Brasileira, 1995.

YAMASHITA, T. Certificado de Análise dos Gases de Exaustão – PUREFA. Relatório de Ensaio - WHITE MARTINS. São Paulo, 2004.

WEILAND, Peter. Biogas Production: Current State and Perspectives. Applied Biochemistry and Biotechnology. Vol. 85. p. 849 – 860. 2009.

8. ANEXOS

Anexo A – Dados de consumo, em kWh, da ETE Insular em Florianópolis

Ano	MÊS	Horário de Ponta	Horário Fora de Ponta	Total
-	-	kWh	KWh	kWh
2010	Jan	13.715	211.951	225.666
	Fev	14.730	185.865	200.595
	Mar	9.669	204.159	213.828
	Abr	7.172	204.603	211.775
	Mai	17.335	178.937	196.272
	Jun	22.672	245.950	268.622
	Jul	24.167	231.540	255.707
	Ago	22.682	203.234	225.916
	Set	19.513	203.020	222.533
	Out	24.789	247.026	271.815
	Nov	22.108	223.056	245.164
	Dez	24.811	255.678	280.489
2011	Jan	27.332	265.363	292.695
	Fev	21.089	199.496	220.585
	Mar	20.701	222.033	242.734
	Abr	26.720	247.846	274.566
	Mai	25.932	278.603	304.535
	Jun	22.771	228.261	251.032
	Jul	24.110	236.498	260.608
	Ago	24.430	240.236	264.666
	Set	22.066	244.972	267.038
	Out	26.987	271.794	298.781
	Nov	19.018	226.167	245.185
	Dez	26.513	268.253	294.766
Preço do kWh	-	R\$ 1,27	R\$ 0,21	-

Fonte: Casan

Anexo B- Tabela de estimativa de consumo médio mensal de eletrodomésticos de acordo com um uso hipotético

Aparelhos Elétricos	Dias Estimados Uso/Mês	Média Utilização/Dia	Consumo Médio Mensal (Kwh)
APARELHO DE BLU RAY	8	2 h	0,192
APARELHO DE DVD	8	2 h	0,24
APARELHO DE SOM 3 EM 1	20	3 h	6,6
AQUECEDOR DE AMBIENTE	15	8 h	193,44
AQUECEDOR DE MAMADEIRA	30	15 min	0,75
AQUECEDOR DE MARMITA	20	30 min	0,6
AR-CONDICIONADO TIPO JANELA MENOR OU IGUAL A 9.000 BTU	30	8 h	128,8
AR-CONDICIONADO TIPO JANELA DE 9.001 A 14.000 BTU	30	8 h	181,6
AR-CONDICIONADO TIPO JANELA MAIOR QUE 14.000 BTU	30	8 h	374
AR-CONDICIONADO TIPO SPLIT MENOR OU IGUAL A 10.000 BTU	30	8 h	142,288
AR-CONDICIONADO TIPO SPLIT DE 10.001 A 15.000 BTU	30	8 h	193,76
AR-CONDICIONADO TIPO SPLIT DE 15.001 A 20.000 BTU	30	8 h	293,68
AR-CONDICIONADO TIPO SPLIT DE 20.001 A 30.000 BTU	30	8 h	439,2
AR-CONDICIONADO TIPO SPLIT MAIOR QUE 30.000 BTU	30	8 h	679,2
ASPIRADOR DE PÓ	30	20 min	7,17
BATEDEIRA	8	20 min	0,4
BOILER ELÉTRICO DE 200 L	30	24 h	346,75
BOMBA D'ÁGUA 1/2 CV	30	30 min	7,2
BOMBA D'ÁGUA 1/3 CV	30	30 min	6,15
CAFETEIRA ELÉTRICA	30	1 h	6,565
CAFETEIRA EXPRESSO	30	1 h	23,82
CHALEIRA ELÉTRICA	30	1 h	28,23
CHURRASQUEIRA ELÉTRICA	5	4 h	76

Aparelhos Elétricos	Dias Estimados Uso/Mês	Média Utilização/Dia	Consumo Médio Mensal (Kwh)
CHUVEIRO ELÉTRICO - 5500 W	30	32 min	88
COMPUTADOR	30	8 h	15,12
ENCERADEIRA	2	2 h	1,8
ESPRESSO DE FRUTAS	20	10 min	0,187
EXAUSTOR FOGÃO	30	2 h	9,96
FAX MODEM EM STAND BY	30	24 h	2,16
FERRO ELÉTRICO AUTOMÁTICO A SECO - 1050 W	12	1 h	2,4
FERRO ELÉTRICO AUTOMÁTICO A VAPOR - 1200 W	12	1 h	7,2
FOGÃO ELÉTRICO - COOK TOP (POR QUEIMADOR)	30	1 h	68,55
FORNO ELÉTRICO	30	1 h	15
FORNO MICRO-ONDAS - 25 L	30	20 min	13,98
FREEZER VERTICAL/HORIZONTAL	30	24 h	47,55
FREEZER VERTICAL FROST FREE	30	24 h	54
FRIGOBAR	30	24 h	18,9
FRITADEIRA ELÉTRICA	15	30 min	6,81
FURADEIRA	4	1 h	0,944
GELADEIRA 1 PORTA	30	24 h	25,2
GELADEIRA 1 PORTA FROST FREE	30	24 h	39,6
GELADEIRA 2 PORTAS	30	24 h	48,24
GELADEIRA 2 PORTAS FROST FREE	30	24 h	56,88
GRILL	10	30 min	3,205
HOME THEATER - 350 W	8	2 h	5,6
IMPRESSORA	30	1 h	0,45
LÂMPADA FLUORESCENTE COMPACTA - 11 W	30	5 h	1,65
LÂMPADA FLUORESCENTE COMPACTA - 15 W	30	5 h	2,25

Aparelhos Elétricos	Dias Estimados Uso/Mês	Média Utilização/Dia	Consumo Médio Mensal (Kwh)
LÂMPADA INCANDESCENTE - 40 W	30	5 h	6
LÂMPADA INCANDESCENTE - 60 W	30	5 h	9
LÂMPADA INCANDESCENTE - 100 W	30	5 h	15
LAVADORA DE LOUÇAS	30	40 min	30,86
LAVADORA DE ROUPAS	12	1 h	1,764
LIQUIDIFICADOR	15	15 min	0,806
MÁQUINA DE COSTURA	10	3 h	3
MODEM DE INTERNET	30	8 h	1,92
MONITOR	30	8 h	13,2
MONITOR LCD	30	8 h	8,16
MULTIPROCESSADOR	20	1 h	8,56
NEBULIZADOR	16	2,5 h	1,68
NOTEBOOK	30	8 h	4,8
PANELA ELÉTRICA	20	1 h	22
PRANCHA (CHAPINHA)	20	30 min	0,33
PROJETOR	20	1 h	4,78
RÁDIO ELÉTRICO PEQUENO	30	10 h	1,5
RÁDIO RELÓGIO	30	24 h	3,6
ROTEADOR	30	8 h	1,44
SANDUICHEIRA	30	10 min	3,348
SCANNER	30	1 h	0,27
SECADOR DE CABELO - 1000 W	30	10 min	5,215
SECADORA DE ROUPA	8	1 h	14,92
TANQUINHO	12	1 h	0,84
TELEFONE SEM FIO	30	24 h	2,16

Aparelhos Elétricos	Dias Estimados Uso/Mês	Média Utilização/Dia	Consumo Médio Mensal (Kwh)
TORRADEIRA	30	10 min	4
TV EM CORES - 14" (TUBO)	30	5 h	6,3
TV EM CORES - 29" (TUBO)	30	5 h	15,15
TV EM CORES - 32" (LCD)	30	5 h	14,25
TV EM CORES - 40" (LED)	30	5 h	12,45
TV EM CORES - 42" (LCD)	30	5 h	30,45
TV PORTÁTIL	30	5 h	7,05
VENTILADOR DE MESA	30	8 h	17,28
VENTILADOR DE TETO	30	8 h	17,52
VIDEOGAME	15	4 h	1,44

Fonte: Adaptado de Eletrobrás